

**И. С. Никитин<sup>\*</sup>, А. Э. Федосеева**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород

<sup>\*</sup>*Ivanya94@mail.ru*

Научный руководитель – канд. физ.-мат. наук *Н. Р. Дудова*

## ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СТАЛИ 10Х9В2МФБР В ПРОЦЕССЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Было исследовано влияние пластической деформации на микроструктурные изменения в 9%Cr стали мартенситного класса при испытании на длительную прочность при 650 °С и напряжении 80 МПа. Было обнаружено, что пластическая деформация не оказывает существенного влияния на коагуляцию частиц. Завершенность процесса полигонизации при длительном старении и ползучести была оценена путем сравнения экспериментального размера субзерен с рассчитанными значениями размера субзерна согласно различным теориям укрупнения субзерен.

*Ключевые слова:* 9%Cr сталь мартенситного класса, ползучесть, коагуляция частиц.

***I. S. Nikitin, A. E. Fedoseeva***

## THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON THE MICROSTRUCTURAL CHANGES IN THE STEEL 10X9B2MФБР DURING CREEP

The effect of plastic deformation on the microstructural changes in the 9%Cr martensitic steel crept at 650 °C under an applied stress of 80 MPa was investigated. Creep deformation does not significantly affect particle coarsening. The termination of polygonization under long-term aging and creep was estimated by the comparison of experimentally obtained and theoretically predicted subgrain sizes.

*Keywords:* 9%Cr martensitic steel, creep, subgrain, coarsening.

Стали мартенситного класса являются перспективным материалом для изготовления элементов котлов и паропроводов новых энергоблоков, способных работать при суперсверхкритических параметрах пара ( $T = 600\text{--}620$  °С,  $P = 25\text{--}34$  МПа) [1].

В качестве материала исследования был изучен российский аналог известной стали P92 (10Х9В2МФБР) со следующим химическим составом (в вес. %): Fe-0,097C-0,17Si-0,54Mn-8,75Cr-0,51Mo-1,6W-0,23V-0,07Nb-0,21Ni-0,04N-0,003B. Термическая обработка заключалась в нормализации с  $T = 1050$  °С в течение 0,5 ч, охлаждение на воздухе, и отпуске при 780 °С

в течение 3 ч, охлаждение на воздухе. Испытание на длительную прочность проводилось при температуре 650 °С под напряжением 80 МПа до разрушения. Время до разрушения составило 9273 ч. Были исследованы следующие части образца: захватная часть, где отсутствовала пластическая деформация, рабочая часть, в которой пластическая деформация была равномерной (относительное сужение – 8,5 %), и зона шейки, в которой была локализована пластическая деформация (относительное сужение – 46 %). Исследование микроструктуры проводилось на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) *JEOL-2100* при ускоряющем напряжении 200 кВ. Размеры структурных элементов определяли методом случайных секущих. Плотность решеточных дислокаций оценивали по числу точек выхода дислокаций на верхнюю/нижнюю поверхность фольги.

После отпуска при 780 °С структура стали 10X9B2МФБР представляет смешанную реечно-субзеренную структуру со средним размером реек/субзерен около 0,4 мкм. Границы исходных аустенитных зерен, блоков, пакетов и реек/субзерен декорированы частицами карбидов  $M_{23}C_6$  со средним размером 73 нм, карбонитриды  $M(C,N)$  со средним размером около 17 нм равномерно распределены в объеме матрицы. Плотность дислокаций составила  $\sim 2,5 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ .

Структура после длительного старения в течение 9273 ч оценивалась в захватной части образца, где пластическая деформация отсутствовала. Было обнаружено, что длительное старение привело к трансформации реечно-субзеренной структуры к полностью субзеренной структуре (рис. 1, а), при этом размер субзерен и плотность дислокаций незначительно отличались от таковых в отпущенном состоянии.

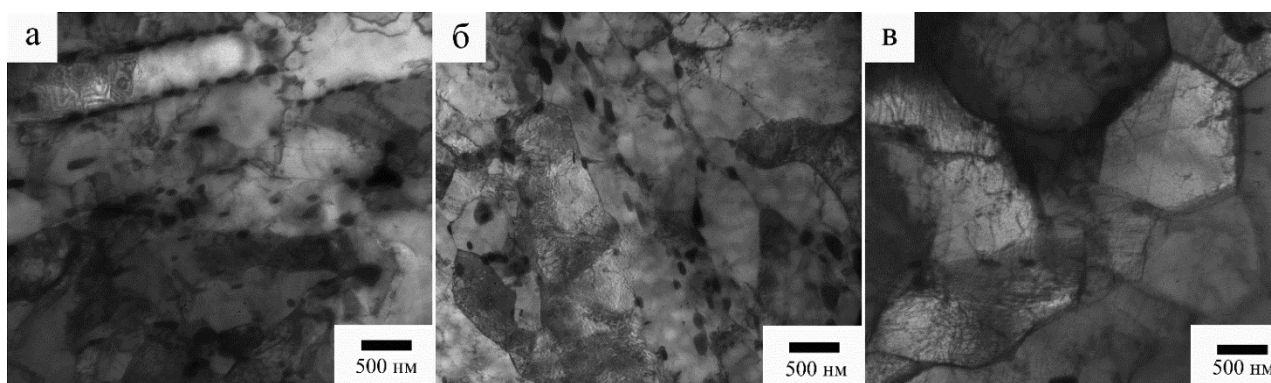


Рис. 1. Микроструктура стали P92: а – после старения при 650 °С; б – после испытания на длительную прочность при 650 °С; в – 80 МПа в рабочей части образца и в шейке образца

После ползучести в рабочей части образца формируется субзеренная структура (рис. 1, б), при этом средний размер субзерен увеличивается до 0,6 мкм, что сопровождается снижением плотности дислокаций (рис. 2, а). Структура, сформированная в зоне шейки образца, представляет собой практически равноосные крупные полигонизованные субзерна (рис. 1, в и 2, а) с низкой плотностью дислокаций внутри них (рис. 2, а). Таким

образом, пластическая деформация способствует росту субзерен и снижению плотности дислокаций.

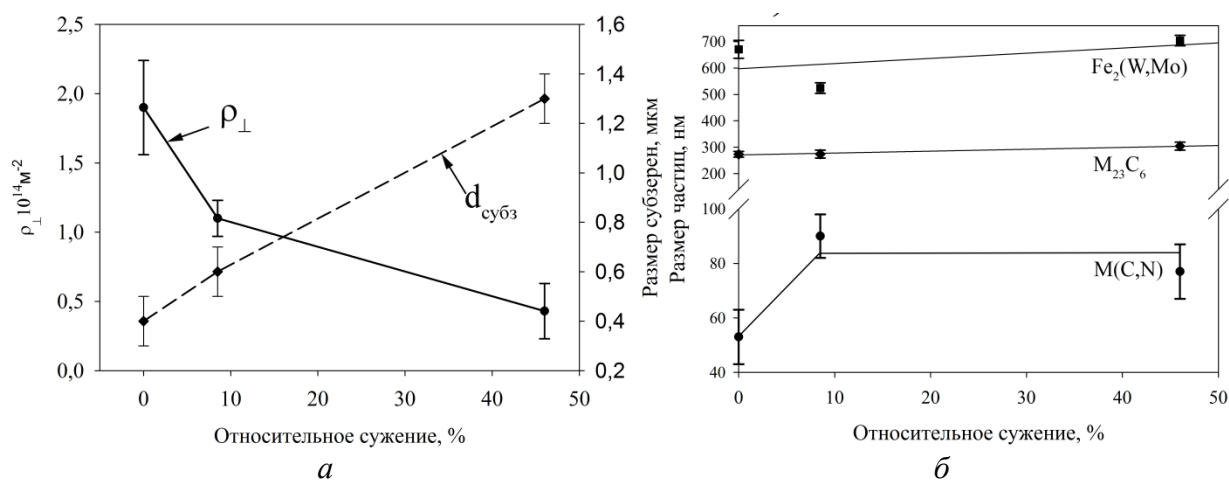


Рис. 2. Зависимость плотности дислокаций и размера субзерен (а) и размера частиц вторых фаз (б) от относительного сужения образца при испытании на длительную прочность при температуре 650 °С и напряжении 80 МПа

В процессе длительного старения и ползучести при 650 °С происходит выделение крупных частиц фазы Лавеса, преимущественно, по границам исходных аустенитных зерен. По сравнению с отпущенным состоянием наблюдается сильный рост карбидов  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  с 73 нм до 300 нм после испытания на длительную прочность при 650 °С и 80 МПа. Пластическая деформация не оказывает влияния на размер и распределение этих фаз (рис. 2, б). После длительного старения при 650 °С средний размер карбонитридов  $\text{M}(\text{C}, \text{N})$  увеличился в 2,5 раза по сравнению с отпущенным состоянием, в то время как после ползучести частицы  $\text{M}(\text{C}, \text{N})$ , обнаруженные в рабочей части и в зоне шейки образца, укрупнились в 5 раз, как показано на рис. 2, в. Таким образом, пластическая деформация ускоряет коагуляцию карбонитридов  $\text{M}(\text{C}, \text{N})$ .

На основе полученных результатов было установлено, что при длительном старении идет процесс статической полигонизации, а в процессе ползучести – процесс динамической полигонизации. Отметим, что признаков рекристаллизации обнаружено не было. Равновесный размер субзерен можно оценить из соотношения движущих и тормозящих сил.

Движущей силой полигонизации является энергия границ зерен/субзерен, она определяется выражением (1):

$$P_2 = \frac{2\gamma}{r} = \frac{2\gamma}{\alpha D}, \quad (1)$$

где  $r$  – радиус кривизны границы субзерна [ $\mu\text{м}$ ], который пропорционален размеру субзерна  $D$  [ $\mu\text{м}$ ],  $\gamma$  – поверхностная энергия [ $\text{Дж}/\text{см}^2$ ],  $\alpha$  – постоянная, была принята равной 4.

Тормозящая сила Зинера, обусловленная равномерно расположенными частицами  $M_{23}C_6$ ,  $M(C,N)$  и фазы Лавеса, определяется формулой (2):

$$P_z = 3\gamma \frac{F_v}{d}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – поверхностная энергия [Дж/см<sup>2</sup>],  $F_v$  – объемная доля частиц вторых фаз,  $d$  – средний размер частиц [м]. Равновесные объемные доли частиц были рассчитаны с использованием программы *Thermo-Calc*: доля карбидов  $M_{23}C_6$  составила 1,90 %, доля частиц фазы Лавеса – 0,69 % и доля  $M(C,N)$  – 0,27 %.

Приравнивая уравнения (1) и (2), можно определить максимальный размер субзерен, который может быть достигнут в процессе ползучести:

$$D = 2/[3\alpha \sum(F_{vi}/d_i)]. \quad (3)$$

Однако, некоторые исследователи связывают размер субзерен со степенью пластической деформации и прикладываемого напряжения при бесконечном времени испытания. Данная зависимость описывается выражением (4):

$$D_\infty = 10Gb/[\sigma(1 + \varepsilon)]. \quad (4)$$

где  $G$  – модуль сдвига [МПа],  $b$  – вектор Бюргерса [м],  $\sigma$  – приложенное напряжение [МПа],  $\varepsilon$  – накопленная степень деформации [2].

Выражение (4) может быть модифицировано [3] с учетом исходных параметров структуры, помимо степени деформации и прикладываемого напряжения, и определено с помощью выражения (5):

$$\text{Log}D = \text{log}D_\infty + \text{log}\left(\frac{D_0}{D_\infty}\right) \exp\left[-\frac{\varepsilon}{k(\sigma)}\right], \quad (5)$$

где  $D_0$  – исходный размер субзерен после отпуска [м],  $D_\infty$  – равновесный размер субзерна, рассчитанный из выражения (4),  $\varepsilon$  – накопленная степень деформации,  $k(\sigma)$  – постоянная роста, равная 0,12 [3].

Теоретические размеры субзерен, рассчитанные по формулам (3), (4) и (5), представлены в таблице. Видно, что экспериментальный размер субзерен после длительного старения в течение 9273 ч в области захвата не достигает равновесного размера субзерен, определяемого балансом движущих и тормозящих сил. Таким образом, в захвате образца процесс статической полигонизации остается незавершенным.

### Рассчитанные и экспериментальные размеры субзерна

Часть образца	$D_{\text{эксп}}$ , мкм	$DP2=P_z$ , мкм (по ф-ле (3))	$D_{\infty}$ , мкм (по ф-ле (4))	$D$ , мкм (по ф-ле (5))
Захват	$0,40 \pm 0,10$	1,27	–	–
Рабочая часть	$0,60 \pm 0,25$	1,48	1,72	0,84
Шейка	$1,30 \pm 0,40$	1,54	1,28	1,25

Модифицирование выражения (4) путем добавления в расчет исходных параметров структуры позволяет получить рассчитанный размер субзерна, близкий к экспериментальным данным в рабочей части образца и в зоне шейки. Было выявлено, что повышение накопленной пластической деформации способствует формированию полностью полигонизованной равноосной структуры.

Таким образом, при сравнении экспериментальных размеров субзерен с рассчитанными значениями, соответствующими различным подходам к укрупнению субзерен, было выявлено, что при длительном старении при 650 °С в течение 9273 ч процесс статической полигонизации не завершается. В рабочей части и в зоне шейки образца укрупнение субзерен в большей мере определяется исходными параметрами структуры, величиной приложенного напряжения и величиной накопленной пластической деформации.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00173).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dub A. V., Skorobogatykh V. N., Shhenkova I. A. New Heat-Resistant Chromium Steels for a Promising Objects of Power Engineering // Thermal Engineering. 2008. V. 55. P. 594–601.
2. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. // М. : МИСИС, 2005. 432 с.
3. Microstructural stability of 9-12%Cr, ferrite/martensite steels / W. Yan [et al.] // Frontiers of Materials Science. 2013.V. 7(1). P. 1–27.